

Моисейкин Евгений Витальевич

**ИНТЕРАКТИВНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЛОВУШЕК  
В КРИСТАЛЛАХ АНИОН-ДЕФЕКТНОГО ОКСИДА АЛЮМИНИЯ**

Специальность 01.04.07 – Физика конденсированного состояния

Автореферат  
Диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Екатеринбург 2011

Работа выполнена на кафедре физические методы и приборы контроля качества физико-технического факультета ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого президента России Б.Н. Ельцина».

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,  
профессор,  
Мильман Игорь Игоревич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
главный научный сотрудник,  
Соколов Виктор Иванович

доктор физико-математических наук,  
профессор,  
Кащенко Михаил Петрович

Ведущая организация: Институт электрофизики Уральского  
отделения РАН

Защита состоится 22 апреля 2011 года в 15-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.285.02 при ФГАОУ ВПО "УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина" по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19 (5-й учебный корпус), аудитория I главного учебного корпуса (зал Ученого совета)

С диссертацией можно ознакомиться в читальном зале библиотеки ФГАОУ ВПО "УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина"

Отзыв на автореферат в одном экземпляре, заверенный гербовой печатью, просим направить по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ФГАОУ ВПО "УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина", ученому секретарю университета.

Автореферат разослан \_\_\_\_ марта 2011 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
профессор, доктор физико-математических наук

Г.И. Пилипенко

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Явление люминесценции твердых, жидких, газообразных материальных сред искусственного и естественного происхождения, за более чем вековой период интенсивного изучения, в настоящее время является важнейшим объектом теоретических и экспериментальных исследований. Главными направлениями этих исследований являются: получение информации о природе, строении, свойствах изучаемых объектов, поиск и разработка новых люминесцирующих материалов, широко применяемых во многих отраслях науки и промышленности, связанных с количественной и качественной регистрацией излучений изотопных источников, ядерных установок, ускорителей заряженных частиц, космического пространства.

Для решения задач индивидуальной, технологической и аварийной дозиметрии, охраны окружающей среды широкое распространение получило применение термостимулированной люминесценции (ТЛ) твердых тел и созданная на ее базе термолюминесцентная дозиметрия ионизирующих излучений и нейтронов.

Устоявшаяся номенклатура соединений, используемых для создания термолюминесцентных радиационно-чувствительных сред и детекторов излучений на их основе, наиболее распространенными из которых являются  $\text{LiF}$ ,  $\text{CaF}_2\text{:Mn}$ ,  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ,  $\text{BeO}$  и др., около 20 лет назад пополнилась новым высокочувствительным материалом – анион-дефектным монокристаллическим номинально чистым  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ . Термолюминесцентные детекторы, полученные впервые на основе этого материала (ТЛД-500К) в УГТУ-УПИ, в настоящее время по многим характеристикам занимают лидирующее положение в отечественной и зарубежной практике. Дальнейшие исследования радиационно-оптических свойств анион-дефектного корунда выявили ряд новых особенностей ТЛ этого материала, не вытекающих из общепринятых кинетических моделей явления, главными из которых являются: температурное тушение люминесценции, зависимость высвечиваемой светосуммы от скорости нагрева, нелинейность дозовой характеристики, повышенная светочувствительность. Важной особенностью данного материала оказалось то, что обнаружилась возможность опустошать уровни захвата носителей заряда, заполненные при облучении, с последующей люминесценцией, не только подведением тепловой энергии, но и избирательно, с помощью оптической стимуляции видимого или инфракрасного диапазонов длин волн. Практическое применение этой особенности анион-дефектных кристаллов  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  интенсивно реализуется в новом направлении твердотельной дозиметрии, основанной на оптически стимулированной люминесценции (ОСЛ).

Таким образом, актуальность темы, помимо прикладного значения, обусловлена тем, что исследование особенностей ТЛ и ОСЛ кристаллов анион-дефектного корунда, разработка модельных представлений об

ответственных за них механизмах, расширяют область фундаментальных знаний о стимулированных релаксационных процессах в облученных широкозонных диэлектриках.

Работа частично поддержана грантом РФФИ (грант N 10-08-96045) «Развитие люминесцентных методов и разработка новых материалов для радиационно-экологического мониторинга» и федеральной целевой программой «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России».

### **Цель работы и задачи исследования**

Целью настоящей работы является комплексное исследование и разработка модельных представлений о механизмах конкурирующего захвата носителей заряда, освобожденных в процессе стимуляции, и связанных с ними особенностях люминесценции облученных анион-дефектных монокристаллов оксида алюминия.

Для достижения поставленной цели требовалось решить следующие основные задачи:

1. Выявить систему глубоких ловушек по данным ТЛ.
2. Исследовать закономерности заполнения глубоких ловушек при освобождении носителей в процессе измерения ТЛ, связи этого процесса со скоростью нагрева, с повышением чувствительности к облучению, с появлением сверхлинейной области у зависимости выхода ТЛ от дозы предварительного облучения.
3. На базе новых экспериментальных методик (фототрансферная термолюминесценция (ФТТЛ) и оптически стимулированная люминесценция (ОСЛ)) изучить детали механизма взаимодействия уровней захвата различной термической глубины, включающие закономерности освобождения под действием оптического излучения и перенос носителей заряда с глубоких ловушек на термически более мелкие, в том числе обуславливающие основной ТЛ пик.
4. Изучить возможности использования сильнооточных электронных пучков для оценки дефектности исследуемых объектов по спектрам ИКЛ и быстрого заполнения глубоких ловушек при комнатной температуре.
5. В рамках модели интерактивного взаимодействия ловушек и соответствующей ей системе дифференциальных уравнений провести сравнение экспериментально наблюдаемых особенностей дозовой зависимости с данными теоретических расчетов.

### **Научная новизна**

1. Получены новые экспериментальные доказательства реальности существования интерактивного механизма взаимодействия между центрами захвата носителей заряда в кристаллах анион-дефектного корунда в

результате измерения зависимости эффективности заполнения глубокой ловушки от скорости нагрева кристаллов при считывании ТЛ.

2. На основе модели интерактивного взаимодействия ловушек экспериментально и теоретически объяснена нелинейность дозовой зависимости. Показано, что за счет заполнения глубоких ловушек в циклах облучение – нагрев происходит рост чувствительности кристаллов.

3. По данным спектров оптически стимулированного опустошения/заполнения ловушек, ответственных за основной ТЛ пик, сделан вывод, о наличии нескольких перекрывающихся компонент, обусловленных пространственно примыкающими ловушками, каждая из которых имеет свою собственную оптическую глубину.

4. По результатам комплексных исследований ТЛ, ФТТЛ и ОСЛ сделан вывод о близости по природе ловушек, ответственных за основной ТЛ пик и ОСЛ, и их способности терять или захватывать заряд при оптической стимуляции.

5. Установлено, что данные спектров ИКЛ могут быть использованы для оценки дефектности исследуемых объектов, а применяемые для их получения сильноточные электронные пучки заполняют глубокие ловушки при комнатной температуре.

6. Изученные особенности люминесценции, связанные с механизмом интерактивного взаимодействия центров захвата носителей заряда различной энергетической глубины в кристаллах анион-дефектного корунда, положены в основу разработки ряда принципиально новых применений стандартных ТЛ детекторов ядерных излучений ТЛД-500К.

### **Практическая значимость полученных результатов**

На основе комплекса экспериментальных результатов по исследованию дозиметрических свойств анион-дефектных монокристаллов  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  предложены и реализованы:

1. Способ повторного измерения дозиметрического термолюминесцентного сигнала в твердотельных детекторах ионизирующих излучений, подтвержденный патентом на изобретение.

Основу разработанного способа составляют обнаруженные в работе закономерности заполнения глубоких ловушек в процессе считывания ТЛ. В ТЛ-дозиметрии способ повторного измерения является резервным и может быть использован при потере информации при первом считывании.

2. Способ термолучевой подготовки к экспозициям термолюминесцентных детекторов ионизирующих излучений на основе оксида алюминия, подтвержденный патентом на изобретение.

Физической основой способа являются полученные в работе результаты по фототрансферному переселению носителей зарядов из глубоких ловушек с пиком ТЛ при 720 К на основную с последующим ее опустошением при

450 К. В результате применения описанного способа сохраняется стабильность чувствительности детекторов в процессе эксплуатации.

3. Устройство для измерения дозиметрического сигнала оптически стимулированной люминесценции, подтвержденное патентом на изобретение.

В основу разработки устройства положены результаты изучения спектров оптического опустошения и заполнения основной ловушки. Устройство обладает упрощенной конструкцией измерения сигнала оптически стимулированной люминесценции.

4. Способ измерения дозы в твердотельных детекторах ионизирующих излучений на основе оксида алюминия, накопленной при повышенной температуре окружающей среды.

Основой способа является изученная в работе зависимость выхода ОСЛ от состояния заселенности глубоких ловушек. С его помощью возможно измерение доз, накопленных при температуре окружающей среды выше 550 К.

5. Способ возбуждения дозиметрического сигнала оптически стимулированной люминесценции детекторов ионизирующих излучений на основе оксида алюминия.

В основу способа положены результаты изучения спектров оптического опустошения основной ловушки и параметров ОСЛ. Положительным эффектом изобретения является увеличение чувствительности и сокращение времени считывания дозиметрического сигнала ОСЛ.

6. Идеология, техническая документация и программный продукт по управлению, пуску и эксплуатации сертифицированной автоматизированной термолюминесцентной дозиметрической системы «Сапфир-001», выпускаемой ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н.Ельцина» совместно с Уральским электромеханическим заводом.

7. Методика измерения ОСЛ с применением отечественной элементной базы, ориентированной на создания дозиметрической системы нового поколения, основанной на явлении оптически стимулированной люминесценции.

### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Доказана возможность использования представлений о механизме конкурирующего захвата носителей заряда ловушками различной глубины для объяснения особенностей ТЛ и родственных с ней явлений ФТТЛ и ОСЛ.

2. Впервые обнаружена зависимость эффективности заполнения глубокой ловушки при 720 К от скорости нагрева кристаллов при считывании ТЛ в основном дозиметрическом пике при 450 К и числа циклов измерений.

3. Впервые экспериментально и теоретически установлена связь сверхлинейности дозовой зависимости выхода ТЛ в основном пике с ростом чувствительности кристаллов за счет заполнения глубоких ловушек в циклах облучение – нагрев.

4. Получены экспериментальные доказательства того, что происхождение ОСЛ и ТЛ в основном пике, в случае пустых глубоких ловушек обусловлены одной и той же или близкими по природе ловушками, опустошаемыми при термической или оптической стимуляции.

5. Установлено, что при заполненных глубоких ловушках в результате переселения носителей заряда с глубоких ловушек на более мелкие во время оптической стимуляции приводит к появлению стадии разгорания и существенному увеличению времени затухания ОСЛ.

6. Показано, что ряд особенностей ТЛ, ОСЛ и ФТТЛ, непосредственно связанных со взаимодействием центров захвата носителей заряда различной энергетической глубины, могут быть использованы для расширения функциональных возможностей дозиметрических аспектов применения кристаллов анион-дефектного корунда в качестве детекторов ядерных излучений.

### **Личный вклад автора**

Все результаты работы, вынесенные на защиту и приведенные в разделе «научная новизна», получены лично автором, а также в сотрудничестве с коллегами по кафедрам "Физические методы и приборы контроля качества" и "Экспериментальная физика" Физико-технического факультета ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н.Ельцина». Участие в работе каждого сотрудника отражено в совместных публикациях по теме диссертации.

### **Апробация работы**

По результатам диссертационной работы подготовлены следующие доклады, представленные на конференциях: Температурная зависимость эффективности фотоконверсии F- и F<sup>+</sup>-центров в анион-дефектных монокристаллах корунда, *Международная школа-Конференция молодых ученых "Современные проблемы радиационной физики твердого тела", Томск, Россия, 2001*; The interaction between trapping centers in single crystals of anion-defective corundum, *II International Workshop "Physical aspects of the luminescence of complex oxide dielectrics", Lviv, Ukraine, 8-10 July, 2002*; Особенности люминесценции анион-дефектных кристаллов  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ , при облучении сильноточным электронным пучком, *Международная конференция "Радиационно-термические эффекты и процессы в неорганических материалах", Томск, Россия, 2002*; ТЛ свойства дозиметрических кристаллов  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ , облученных сильноточным импульсным электронным пучком, *VIII Международная школа-семинар по Люминесценции и лазерной физике, Иркутск, Россия, 23 - 28 сентября, 2002*; Оптически индуцированное затухание ТЛ в дозиметрических кристаллах анион-дефектного  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ , *2<sup>nd</sup> Scientific Conference and Summer School on Radiation Physics SCORPh-2003 in memory of*

Askar Alybakov, Bishkek - Karakol, Kyrgyzstan, 21-27 July, 2003; Luminescent properties of  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dosimetric crystals exposed to a high-current electron beam, 5<sup>th</sup> European Conference on Luminescent Detectors and Transformers of Ionizing Radiation, Prague, Czech Republic, 1-5 September, 2003; Specific features of luminescence of radiation-colored  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> single crystals, 5<sup>th</sup> European Conference on Luminescent Detectors and Transformers of Ionizing Radiation, Prague, Czech Republic, 1-5 September, 2003; О взаимосвязи ОСЛ и ТЛ дозиметрических кристаллов анион-дефектного корунда, Summer School on Radiation Physics SCORPh-2004, Bishkek - Karakol, Kyrgyzstan, 28-31 July, 2004; Deep-trap competition model for TL in  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:C: Heating stage, 14<sup>th</sup> International Conference on Solid State Dosimetry, New Haven, USA, 27 June - 2 July, 2004; The Role of Deep Traps in The Luminescence Mechanism of Anion-Defective Single Crystals of Aluminum oxide, 15<sup>th</sup> International Conference on Defects in Insulating Materials, Riga, Latvia, 11-16 July, 2004; Nonlinear Dose Dependence of TLD-500K Detectors Resulting from Interactive Interaction of Traps, 6<sup>th</sup> European Conference on Luminescent detectors and transformers of Ionizing Radiation "LUMDETR 2006", Lviv, Ukraine, 19-23 June, 2006; The Peculiarities of Charge Carriers Trapping Processes and Mechanism in Anion defective  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Single Crystals, 13<sup>th</sup> International Conference on Radiation Physics and Chemistry of Inorganic Materials RPC-13, Tomsk, Russia, 10-15 September, 2006; High-temperature thermoluminescence peaks in Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:C, 15<sup>th</sup> International Conference on Solid State Dosimetry, Delft, Netherlands, 8-13 July, 2007; Повторное измерение дозиметрического сигнала детекторов на основе анион-дефектного оксида алюминия, Issyk-Kul Summer School on Radiation Physics, New Materials and Information Technologies (SCORPh-2008), Issyk-Kul, Karakol, Kyrgyzstan, 28 July - 3 August, 2008; Deep traps in  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:C dosimetric crystal, 7<sup>th</sup> European Conference on Luminescent detectors and transformers of Ionizing Radiation "LUMDETR 2009", Krakow, Poland, 12-17 July, 2009; Improving Efficiency of Excitation of Optically Stimulated Luminescence in  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:C Dosimetric Crystals, 14<sup>th</sup> International Conference on Radiation Physics and Chemistry of Inorganic Materials, Astana, Kazakhstan, 6-10 October, 2009; Deep traps in anion-defective crystals  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 11<sup>th</sup> Europhysical Conference on Defects in Insulating Materials, Eurodim 2010, Pécs, Hungary, 12-16 July, 2010.

## **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 17 статей, 15 тезисов и 5 патентов РФ. Список публикаций приведен в конце автореферата.

## **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения, изложена на 122 страницах машинописного текста. С учетом 5 таблиц, 41 рисунка и библиографического списка из 115 наименований. Общий объем диссертации составляет 126 страниц.



## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи исследований, научная новизна полученных результатов, приведены практическая значимость, защищаемые положения и личный вклад автора, структура диссертации.

**В первой главе** приводится обзор литературных данных по способам получения, методам аттестации, радиационно-оптическим свойствам анион-дефектных кристаллов  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ , современному состоянию ТЛ и ОСЛ-дозиметрии, основанной на использовании этого материала в качестве детекторов ионизирующего излучения. Главное внимание уделено особенностям люминесценции кристаллов анион-дефектного корунда, не описываемым обычной кинетикой: уменьшение выхода ТЛ с ростом скорости нагрева, падение величины средней энергии активации в пределах основного пика, сверхлинейный характер дозовой зависимости.

На основе проведенного анализа делается вывод, что до сих пор не существует удовлетворительного объяснения механизма наблюдаемых особенностей люминесценции анион-дефектного корунда. Этот вывод и послужил основанием для постановки цели и задачи исследований (2 таблицы, 7 рисунков, 27 страниц, 73 ссылки на литературу).

**Во второй главе** приведено описание объектов исследования, измерительных установок и экспериментальных методик (1 таблица, 7 рисунков, 15 страниц, 14 ссылок на литературу).

### *Объекты исследования*

В качестве объектов исследований использовались термолюминесцентные детекторы ТЛД-500К, изготовленные на базе номинально чистого, монокристаллического анион-дефектного корунда по технологии, разработанной на кафедре Физические методы и приборы контроля качества в ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н.Ельцина». Образцы имели форму диска диаметром 5 мм и высотой 1 мм.

### *Измерительные установки и методики*

Измерения интенсивностей ТЛ и ОСЛ, спектрального состава ТЛ производилось на специально сконструированном оборудовании. Термолюминесцентная система обеспечивала режимы линейного нагрева со скоростью 0,5 – 32 К/с и изотермической выдержки в диапазоне температур 300 – 1150 К. Установка для регистрации ОСЛ позволяла производить оптическую стимуляцию образцов и измерение люминесценции.

С помощью излучения сильноточного импульсного электронного ускорителя типа РАДАН-220 исследовались спектры ИКЛ и ТЛ, по данным которых производилось сравнение образцов по содержанию некоторых примесей.

**Третья глава** содержит результаты сравнительных исследований особенностей ТЛ свойств анион-дефектных кристаллов  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ , облученных бета излучением  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$  источника (рис.2, кривая 1) и электронным пучком

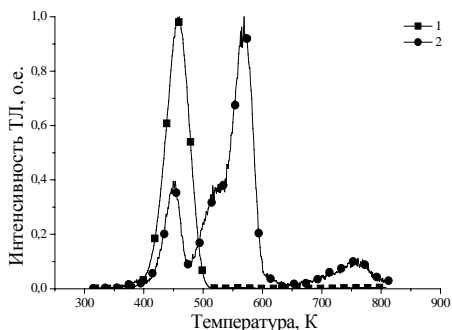


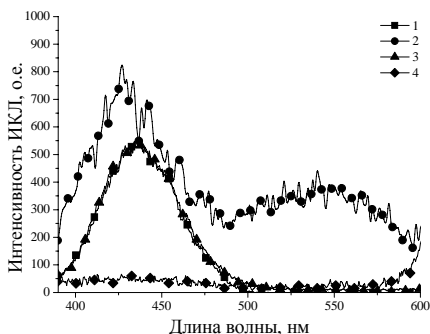
Рис.2. Кривые ТЛ образцов анион-дефектного  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ , облученных бета излучением  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$  источника (1) и импульсным электронным пучком (2)

(кривая 2). Как видно из этого рисунка, наряду с основным при 450К и пиком при 573К, связанным с присутствием ионов хрома, в результате возбуждения электронным пучком, появляются максимумы около 380, 490 и 770К, кроме того, у некоторых образцов обнаруживается пик при 670К.

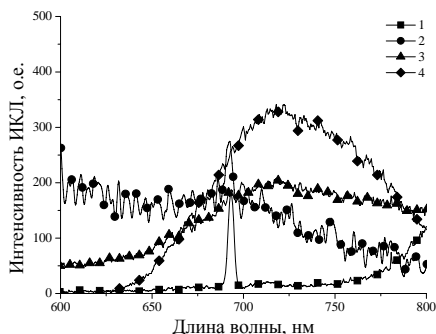
Существенные различия в структуре кривых термовывесивания при возбуждении кристаллов анион-дефектного корунда бета излучением  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$  источника и электронами ускорителя с подпороговой для дефектообразования энергией связываются с разными по природе и концентрации примесями, присутствующими в исследуемых номинально чистых кристаллах. При высокой плотности ионизирующего возбуждения некоторые из этих примесных дефектов могут играть роль ловушек носителей заряда и центров рекомбинации, эффективно люминесцируя как непосредственно в момент взаимодействия пучка электронов с кристаллом, так и при последующем нагреве.

Для проверки этого предположения изучался спектр ИКЛ исследуемых образцов. На рис.1 представлены спектры ИКЛ, измеренные в диапазонах 390 – 600 нм (рис.1 а) и 600 – 800 нм (рис.1 б). В приведенных на этих рисунках спектрах можно выделить три хорошо выраженных полосы при  $\lambda_1 = 436,0 \pm 0,5$  нм и шириной на полувысоте  $\Delta\lambda_1 = 53,0 \pm 3,1$  нм,  $\lambda_2 = 733,4 \pm 3,8$  нм с  $\Delta\lambda_2 = 100,5 \pm 6,2$  нм и узкая полоса  $\lambda_3 = 694,4$  нм.

Первая полоса не элементарная – в ее структуре можно выделить три



а)



б)

Рис.1. Спектры ИКЛ анион-дефектного (кривые 1 – 3) и титанового (кривая 4) корунда: (а) – коротковолновая, (б) – длинноволновая области спектра.

компоненты гауссовской формы при  $\lambda_{11} = 420$ ,  $\lambda_{12} = 436$  и  $\lambda_{13} = 455$  нм. С разной интенсивностью эта сложная полоса наблюдается в спектрах ИКЛ всех изученных образцов. Полоса ИКЛ при 420 нм связана с люминесценцией F-центров, происхождение полос при 436 и 455 нм предстоит выяснить в последующих исследованиях. Узкая полоса при  $\lambda_3 = 694,4$  нм хорошо узнаваема и соответствует свечению ионов  $\text{Cr}^{3+}$  в решетке корунда. Полоса при  $\lambda_2 = 733,4$  нм связана со свечением примесных ионов  $\text{Ti}^{3+}$ . Для обоснования этого утверждения измерялся спектр ИКЛ образца  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:Ti}$  (кривая 4 на рис.1), не содержащего кислородных вакансий. В этом случае спектр ИКЛ характеризуется отсутствием полос в коротковолновой части и наличием интенсивной полосы в длинноволновой области (650-800 нм), идентичной по параметрам с полученными спектрами для исследованной группы кристаллов номинально чистого анион-дефектного оксида алюминия. Полоса при 540 нм, наблюдающаяся в спектрах ИКЛ некоторых образцов, по данным литературы, связывается с  $\text{F}_2^{2+}$ -центрами, представляющими собой дважды ионизованные F<sub>2</sub>-центры, их происхождение обусловлено условиями выращивания кристаллов.

Полоса свечения ионов  $\text{Ti}^{3+}$  с интенсивностью в пике от 1 до 0,06 о.е. наблюдалась в спектрах ИКЛ практически всех образцов, и представлялось естественным связать появление новых пиков на кривой термовысвечивания с присутствием в изучаемых образцах ионов этого типа. Для решения этой задачи измерялась ТЛ образца стехиометрического  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:Ti}$ , облученного электронным пучком. Для лучшего разрешения пиков скорость нагрева выбиралась равной 0,33 К/с.

Результаты измерений образца титанового корунда и трех образцов из исследуемой серии представлены на рис.3. На этом рисунке по данным ИКЛ содержание ионов  $\text{Ti}^{3+}$  в образцах возрастает в последовательности 1-2-3. Соответственно возрастает интенсивность ТЛ пика при 473К. Кривая 4 этого рисунка представляет ТЛ образца  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:Ti}$ , которая характеризуется двумя

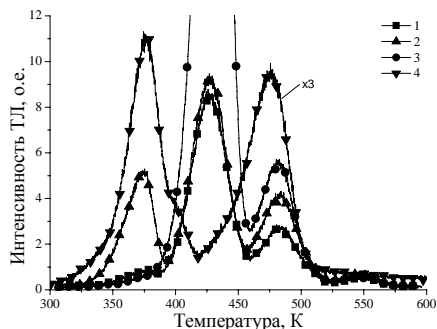


Рис.3. Кривые ТЛ образцов анион-дефектного  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ , (1-3) и титанового корунда (4), облученных импульсным электронным пучком.

пиками около 380 и 490 К и, естественно, отсутствием пика при 450К, характерного только для анион-дефектного корунда. Полученные результаты позволяют утверждать, что пики ТЛ вблизи 380 и 490К связаны с ионами  $\text{Ti}^{3+}$ . Появление этих пиков становится вероятным при высокодозном облучении кристаллов анион-дефектного корунда и детекторов излучений на их основе, за счет ионов  $\text{Ti}^{3+}$ , всегда присутствующих даже в номинально чистых кристаллах  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ . Следует

отметить, что для выявления ТЛ, связанной с ионами титана, потребовалось использовать возбуждение сильноточным электронным пучком. В обычных условиях, при относительно низкодозовых возбуждениях, включая дозиметрические аспекты практического применения кристаллов анион-дефектного корунда, присутствие ионов  $Ti^{3+}$  не выражено так очевидно, однако неявно оно может оказывать влияние на кинетику высвечивания в основном пике ТЛ. Данные элементного состава исследуемых образцов показывают, что помимо ионов хрома и титана, в исследуемых образцах содержатся ионы таких переходных металлов как железо, молибден, никель. Для выяснения их влияния на ТЛ анион-дефектного корунда требуются специальные исследования. Можно только предположить, что некоторые из них в сочетании с собственными дефектами решетки, образуют сложные центры, часть из которых обнаруживается как глубокие ловушки заряда, ответственные за высокотемпературную ТЛ.

**Четвертая глава** посвящена исследованию роли глубоких ловушек в механизме люминесценции анион-дефектных кристаллов оксида алюминия.

Экспериментальным доказательством интерактивной связи между основной и глубокими ловушками являются результаты исследований фототрансферной термолюминесценции, основанной на измерении ТЛ в пике при 450К, индуцированной оптическим переселением зарядов из предварительно заполненной глубокой ловушки на основную, остающуюся пустой после заполнения глубокой. Эти данные представлены на рис.4, здесь приведены кривые термовысвечивания образцов с исходно незаполненной основной и заполненной глубокой ловушками в зависимости от времени оптической стимуляции. Видно, что оптическая стимуляция приводит к переселению зарядов из глубокой ловушки при 720 К на более мелкие, ответственные за пик при 450 и 320 К. Запасенная в глубокой ловушке светосумма уменьшается с увеличением времени стимуляции. ТЛ выход в пиках при 320 и 450 К в начальный момент стимуляции возрастает, а затем постепенно уменьшается. Это объясняется

двумя конкурирующими процессами, с одной стороны действие света приводит к запасанию носителей в пиках при 320 и 450 К, с другой стороны оказывает опустошающее действие, как на глубокую ловушку, так и на пики при 320 и 450 К. Сам факт возбуждения ТЛ в пике при 450К путем оптически стимулированного переноса заряда из глубокой ловушки в основную является прямым доказательством

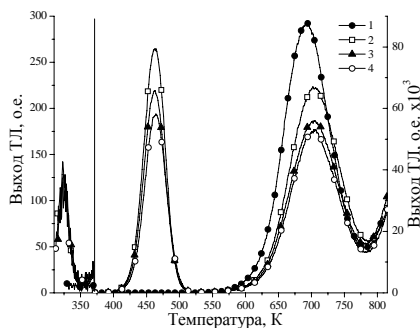


Рис.4. Кривые термовысвечивания образца с предварительно заполненной глубокой ловушкой в зависимости от времени фотостимуляции.  
1-0; 2-5; 3-10; 4-15 мин.

их связи и потенциальной возможности конкурирующего с центрами люминесценции захвата зарядов, освобожденных из основной ловушки при считывании ТЛ, незаполненной глубокой.

Данные рис.4 показывают, что чувствительность ТЛ в основном пике, является эффективным индикатором состояния заселенности глубокой ловушки. Это обстоятельство и предположение о том, что возможен и обратный процесс - заполнение глубоких ловушек носителями заряда, освобожденными при считывании ТЛ (причина падения выхода ТЛ с ростом скорости нагрева), были использованы для обнаружения носителей в глубокой ловушке методом ФТТЛ при ее заполнении в результате нагрева облученных образцов до 620К со скоростью 0,5; 1; 2; 5 и 10 К/с. Результаты этих исследований приведены на рис.5, где представлены зависимости выхода фотоиндуцированной ТЛ (кривая 2) и ТЛ в основном пике при 450К, индуцированные излучением  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$  источника (кривая 1), от скорости нагрева.

Как видно из рис.5 с увеличением скорости нагрева облученных образцов растет выход фотоиндуцированной ТЛ, строго синхронно с которым падает выход ТЛ. Данные этого рисунка являются экспериментальным подтверждением захвата носителей заряда, освобождаемых в температурном диапазоне основного пика ТЛ, глубокой ловушкой.

Концентрация носителей заряда в глубокой ловушке могла быть увеличена путем многократного считывания ТЛ в основном пике. На рис.6 приведена зависимость выхода фотоиндуцированной ТЛ в пике при 450К от скорости нагрева и числа циклов накопления носителей в глубокой ловушке.

Из этого рисунка видно, что накопление заряда в глубокой ловушке

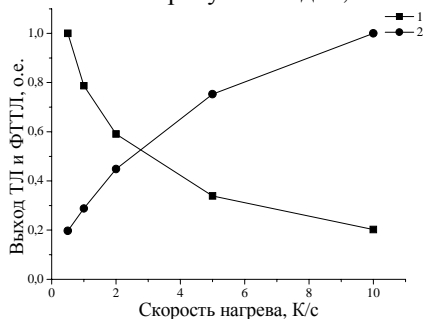


Рис.5. Зависимость выхода ТЛ и фотоиндуцированной ТЛ в пике при 450К от скорости нагрева. Кривая 1 получена по данным измерений образцов  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ , облученных стандартной дозой излучения  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$  источника; кривая 2 - после оптической стимуляции образцов, нагретых с разными скоростями

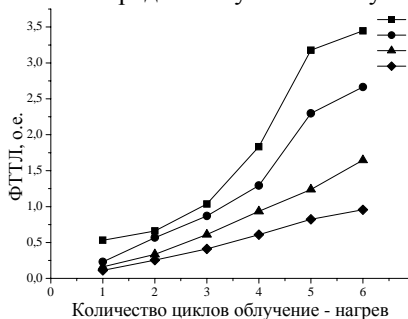


Рис.6. Зависимость выхода фотоиндуцированной ТЛ в пике при 450К от числа циклов облучение излучением  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$  источника – измерение ТЛ со скоростью 1, 2, 5 или 10 К/с – оптическая стимуляция с длиной волны 470 нм.

действительно происходит. При этом наблюдается важная закономерность, чем выше скорость нагрева облученных образцов, тем эффективнее захват освободившихся носителей заряда глубокой ловушкой, выход ТЛ в основном пике возрастает. Учитывая, что рост скорости нагрева приводит к смещению пика ТЛ в область более высоких температур, можно сделать вывод о том, что чем ближе температурная область освобождения заряда при считывании ТЛ к температуре пика глубокой ловушки, тем эффективнее захват носителей этой ловушкой. Подтверждением факта накопления носителей в глубокой ловушке является обнаруженный в этой работе рост чувствительности образцов анион-дефектного корунда в основном пике к облучению в циклах однотипных измерений облучение – измерение ТЛ – облучение, от цикла к циклу выход ТЛ возрастает.

Совокупности экспериментальных результатов, представленных на рис. 4 – 6, объясняется интерактивным взаимодействием основных и термически более глубоких ловушек, не наблюдаемых при обычных (дозиметрических) измерениях ТЛ. Существование глубоких ловушек подтверждено прямыми наблюдениями высокотемпературной ТЛ и косвенными, по данным ФТТЛ.

Базовыми положениями этой модели является конкуренция в захвате свободных носителей заряда, освобожденных при регистрации ТЛ основного пика, между глубокими ловушками и центрами люминесценции. По мере заполнения глубокой ловушки, все большая часть освобожденных носителей начинает участвовать в рекомбинационных процессах, выход ТЛ на единицу поглощенной дозы возрастает, что эквивалентно повышению чувствительности материала к облучению. Другой важный экспериментальный факт, установленный при изучении взаимодействия основной и глубокой ловушек, связан с тем, что эффективность заполнения последней оказалась зависимой от температуры пика ТЛ, при которой в запрещенной зоне кристалла появляются свободные заряды. При этом, чем

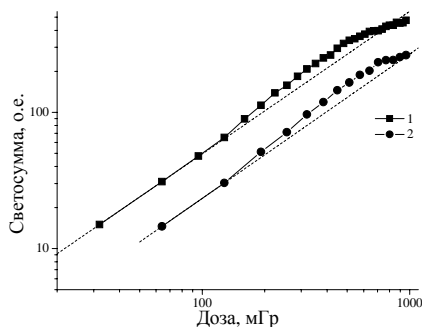


Рис. 7. Дозовая зависимость выхода ТЛ кристаллов анион-дефектного корунда, измеренная с различным шагом изменения дозы, при скорости нагрева 2 К/с

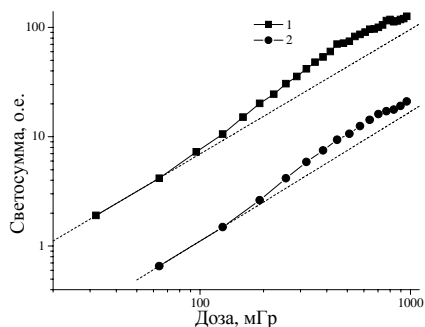


Рис. 8. Дозовая зависимость выхода ТЛ кристаллов анион-дефектного корунда, измеренная с различным шагом изменения дозы, при скорости нагрева 6 К/с

выше эта температура, тем интенсивнее заполняется глубокая ловушка за счет снижения вероятности повторного захвата носителей на энергетически более мелкие ловушки.

В рамках изложенных модельных представлений находит объяснение и такое свойство кристаллов анион-дефектного корунда, как появление нелинейного участка на дозовой зависимости выхода ТЛ в основном пике. Поскольку измерение дозовой зависимости ТЛ в основном пике предполагает повторяющиеся циклы облучение – нагрев – облучение большей дозой, происходит многократное опустошение основной ловушки и накопление зарядов в глубокой ловушке. По мере ее заполнения растет количество носителей заряда, принимающих участие в рекомбинационных процессах, увеличивается чувствительность образцов к излучению, дозовая характеристика отклонялась от линейного роста, проявляет сверхлинейный характер.

В развитии модельных представлений следовало ожидать зависимость величины нелинейности дозовой зависимости, как от скорости нагрева, так и числа циклов облучение – нагрев – облучение при ее получении, в сумме влияющих на степень заполнения глубоких ловушек.

Результаты экспериментального подтверждения такой возможности представлены на рис.7 и рис.8, где изображены дозовые зависимости одного и того же образца, полученные при измерении ТЛ со скоростью нагрева 2 и 6 К/с и шагом дозы облучения 32 и 64 мГр. Сравнение этих рисунков и результаты моделирования процессов, связанных с интерактивным взаимодействием ловушек, показывают явное увеличение протяженности области нелинейности и ее величины с ростом скорости нагрева и увеличения числа циклов облучение – нагрев – последующее облучение. Важным практическим выводом, вытекающим из этих результатов, является то, что вид и форма дозовой зависимости, всегда приводимые в качестве одной из важнейших дозиметрических характеристик материала, оказываются зависимыми от условий ее измерения.

**В пятой главе** рассматривается связь характеристик оптически стимулированной люминесценции и термостимулированной люминесценции кристаллов на основе номинально чистого монокристаллического анион-дефектного корунда.

Показано, что фоточувствительность проявляется в виде трех эффектов: снижение выхода ТЛ вплоть до исчезновения в облученных образцах, генерация ТЛ в необлученных и перенос заряда из глубоких ловушек в более мелкие, приводящий к появлению ТЛ при относительно низких температурах. Приводятся результаты исследования оптически-индуцированного разрушения и генерации ТЛ сигнала в зависимости от длины волны и интенсивности стимулирующего света, времени облучения, состояния заселенности глубоких ловушек.

На рис.9 приведен спектр оптически стимулированного опустошения ловушек, ответственных за пик ТЛ при 450К. Данные этого рисунка

иллюстрируют высокую чувствительность анион-дефектного корунда к видимому свету и объясняют наблюдаемое на опыте его высвечивающее действие, приводящее к потере дозиметрической информации. Интерпретация этого эффекта заключается в том, что стимуляция светом приводит к ионизации ловушки перемещению заряда в зону проводимости, что приводит к снижению ТЛ сигнала. Максимум потери запасенной в ТЛ светосуммы достигается при оптической стимуляции с длиной волны в области около 450 нм. Отсутствие хорошо выраженных селективных максимумов на кривой рис.9 и существенная протяженность спектра позволяют предполагать, что ТЛ сигнал в основном пике состоит из нескольких перекрывающихся компонентов, обусловленных не одной, а несколькими пространственно примыкающими друг к другу ловушками, каждая из которых имеет свою собственную оптическую глубину.

Способность ловушек, ответственных за основной дозиметрический пик, не только терять захваченный заряд при оптической стимуляции, но и захватывать его из локализованных зон доказывается данными по измерению выхода ТЛ в зависимости от длины волны возбуждающего света, приведенными на рис.10. В этих экспериментах использовались образцы с двумя состояниями глубоких ловушек: пустыми (кривая 1) и предварительно заполненными (кривая 2). Как видно, характер спектров в обоих случаях достаточно хорошо совпадает, хотя их абсолютные значения у образцов с заполненной глубокой ловушкой в 10 – 15 раз выше, чем у образцов с пустыми глубокими ловушками. Это наблюдение находится в соответствии с установленной ранее закономерностью существенного повышения выхода ТЛ в основном пике путем предварительного заполнения глубоких ловушек.

В общем случае, фотостимулированное заполнение носителями заряда основных ловушек может являться следствием процессов одновременной

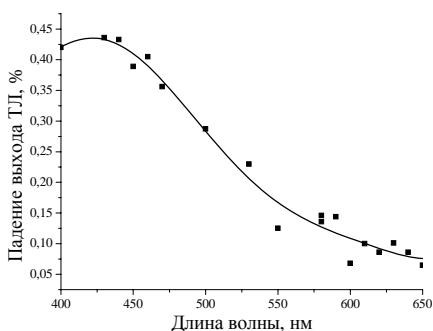


Рис.9. Спектр оптически стимулированного опустошения ловушек, ответственных за дозиметрический пик ТЛ при 450К.

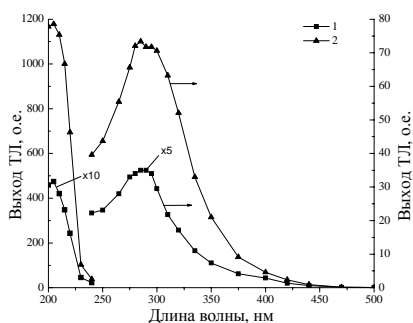


Рис.10. Спектр оптически стимулированного заполнения ловушек, ответственных за дозиметрический пик ТЛ при 450К. 1-глубокие ловушки пустые; 2-глубокие ловушки заполнены.



ионизации нескольких имеющихся в кристаллах дефектных состояний, например, F-центров и центров, названных глубокими ловушками, природа которых все еще остается малоизученной. В этой связи обсуждение экспериментально измеренного спектра оптического заполнения основных ловушек удобно провести отдельно для трех областей, коротковолновой 190 – 250, средневолновой, 250 – 400 и длинноволновой, 400 – 540 нм.

При изучении спектрально-временных зависимостей оптически стимулированного опустошения ловушек, ответственных за основной пик ТЛ при 450К установлено, что максимум потерь запасаемых в ТЛ светосумм достигается в диапазоне длин волн 425 – 470 нм. При этом освобождаемые в зону проводимости носители заряда (электроны) в общем случае могут принять участие в следующих событиях: захват на мелкие или глубокие ловушки; переходы на безизлучательные или излучательные рекомбинационные центры. Последний из перечисленных должен сопровождаться люминесценцией кристалла в основной полосе с максимумом около 420 нм. Однако утверждение о том, что ловушки, обеспечивающие ТЛ в основном пике, являются также оптически активными и ответственными за ОСЛ, не очевидно и нуждается в экспериментальном подтверждении. Действительно, у кристаллов, облученных разными дозами бета излучения, при воздействии светом с длиной волны 470 нм наблюдается люминесценция в полосе 420 нм, затухающая во времени, как это показано на рис.11. Нормированные значения этих кривых проявляют одну и ту же зависимость затухания ОСЛ от времени, сходную с кинетикой затухания ТЛ при фотостимулированном опустошении основной ловушки, приведенной в работе. В обоих случаях эти зависимости близки к экспоненциальной с постоянной времени около 70 с.

Наиболее убедительным подтверждением идентичности активных ловушек ответственных за ТЛ и ОСЛ, являются результаты параллельного

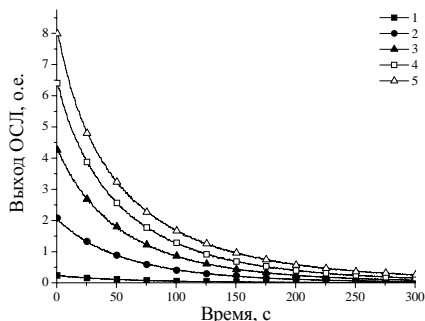


Рис.11. Кинетика затухания ОСЛ образцов с заполненной дозиметрической ловушкой (1 – 32 мГр, 2 – 0,32 Гр, 3 – 0,64 Гр, 4 – 0,96 Гр, 5 – 1,28 Гр).

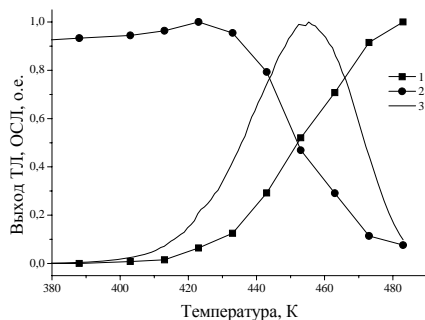


Рис.12. Нормированные значения выходов ТЛ (1) и ОСЛ (2) при повышении температуры ступенчатого отжига. 3 – кривая ТЛ

изучения ОСЛ и ТЛ в зависимости от температуры ступенчатого отжига образцов после облучения бета частицами, представленные на рис.12. Как следует из этого рисунка, выход ОСЛ и ТЛ не меняется при температурах отжига, вплоть до 400 К. Дальнейшее повышение температуры приводит к синхронному падению выхода ОСЛ и росту выхода ТЛ, обе зависимости достигают своих экстремальных значений при одной и той же температуре. Падение выхода ОСЛ с ростом температуры ступенчатого отжига естественно связать с термически стимулированным опустошением основной ловушки, индикатором которого являлось увеличение выхода ТЛ. Совокупность результатов, приведенных на рис.11 и рис.12, позволяет заключить, что происхождение ОСЛ и ТЛ обусловлено одной и той же ловушкой, опустошаемой при термической или оптической стимуляции.

При заполнении носителями заряда первой глубокой ловушки, с пиком ТЛ при 720 К, и последующей оптической стимуляции с длиной волны 470 нм носители переселялись из глубокой ловушки в основную, о чем свидетельствовало появление ТЛ при 450 К. Часть носителей при освобождении из глубоких ловушек может быть захвачена на центры излучательной рекомбинации, приводя к появлению ОСЛ в доминирующей полосе, связанной с свечением F-центров в этих кристаллах. На рис.13 приведена зависимость затухания ОСЛ кристаллов с исходно пустой основной и заполненной глубокой ловушками. Видно, что эта зависимость резко отличается от приведенной на рис.11 формой и временными параметрами. При включении стимуляции первые сто двадцать секунд имеет место разгорание ОСЛ, а затем ее затухание с постоянной времени много большей, чем у ОСЛ, связанной с основной ловушкой. Можно предположить, что в этом случае на ОСЛ оказывает влияние основная ловушка, которая заполняется в первый момент включения стимуляции, давая по мере заполнения, возможность большему числу носителей участвовать в излучательных процессах. В этом случае и будет наблюдаться разгорание ОСЛ, а затем ее затухание, в которое вносит свой вклад затухание ОСЛ основной ловушки и, возможно, еще более глубоких ловушек, заполнившихся одновременно с первой глубокой ловушкой.

Результаты исследованных в работе особенностей люминесценции кристаллов анион-дефектного корунда были использованы для развития дозиметрических аспектов применения ОСЛ, а также разработок, выполненных на уровне изобретений, направленных на расширение функциональных

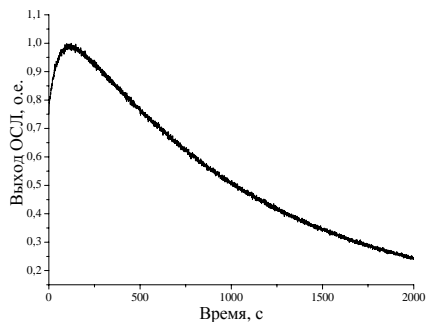


Рис.13. Кинетика затухания ОСЛ образцов с пустой дозиметрической и заполненной глубокой ловушками.

возможностей стандартных ТЛ детекторов ТЛД-500К, основанных на анион-дефектных кристаллах оксида алюминия, в частности:

1. Способ повторного измерения дозиметрического термолюминесцентного сигнала в твердотельных детекторах ионизирующих излучений (патент РФ № 2275655).

Новым в основе предлагаемого способа является установленный экспериментальный факт и связанные с ним особенности заполнения глубокой ловушки в процессе первого измерения ТЛ в дозиметрическом пике. Степень этого заполнения и выход ФТТЛ (повторное считывание) связаны с начальной дозой облучения детектора ионизирующим излучением.

Особенностью заполнения глубокой ловушки в процессе измерения ТЛ в основном пике, выявленной с помощью измерения ФТТЛ, является то, что эффективность заполнения зависит от скорости нагрева детекторов при считывании.

2. Способ термолучевой подготовки к экспозициям термолюминесцентных детекторов ионизирующих излучений на основе оксида алюминия (патент РФ № 2288485).

В предлагаемом способе детекторы перед эксплуатацией облучаются при комнатной температуре оптическим излучением в спектральном диапазоне, соответствующем ионизации и опустошению одновременно дозиметрической и глубокой ловушек. Освобожденные при этом заряды из глубокой ловушки переселяются на основную дозиметрическую и более мелкие ловушки, при этом одновременно идет и процесс опустошения дозиметрической ловушки. Однако одна только лучевая обработка детекторов не обеспечивает полного опустошения дозиметрической ловушки. Для этого проводится последующая температурно-временная обработка, обеспечивая готовность детекторов (дозиметров) к дальнейшей эксплуатации.

В результате применения описанного способа сохраняется стабильность чувствительности детекторов в процессе эксплуатации, снижается их светочувствительность и, как следствие, растут точность, надежность и достоверность проводимых измерений. Применение предлагаемого способа, кроме того, повышает срок эксплуатации дозиметров, основу которых составляет ТЛ-карточка с запаянными в пленку детекторами. В этом случае оптическое опустошение дозиметрической ловушки можно использовать для детекторов с небольшим сроком эксплуатации и, следовательно, с таким уровнем заполнения глубоких ловушек, когда они еще не оказывают влияния на чувствительность, вместо обычного «обнуления» показаний путем термического отжига, проводимого перед очередным циклом экспозиции. Срок службы дозиметров в этом случае повышается за счет снижения количества нагревов, т.е. числа термоударов, испытываемых пленочным покрытием детекторов при нагреве их почти до критической температуры плавления.

3. Устройство для измерения дозиметрического сигнала оптически стимулированной люминесценции (Патент РФ № 2310889).

Детектор располагают между источником стимулирующего излучения и входным окном фотоприемника на расстоянии 2 – 5 мм от поверхности оптического фильтра, примыкающего к фотокатоду ФЭУ.

Источником стимулирующего излучения является один светоизлучающий диод, снабженный призмой Френеля, выходная плоскость которой отстоит от поверхности детектора на расстоянии 1 – 2 мм.

Такая конструкция блока детектирования позволяет увеличить эффективность регистрации ОСЛ за счет существенного сокращения расстояний между источником стимулирующего света и детектором, фотоприемником и излучающей поверхностью детектора в соответствии с законом "обратных квадратов" для энергии возбуждения и люминесценции соответственно.

Нормальное падение потока стимулирующего света на поверхность детектора, исключаяющее потери на отражение, уменьшение расстояния между источником стимулирующего света и детектором, использование призмы Френеля для формирования стимулирующего излучения в узконаправленный пучок с расходимостью не более 100 позволяют существенно упростить систему стимуляции и использовать один светоизлучающий диод, улучшив при этом чувствительность, точность и достоверность дозиметрических измерений.

Предлагаемая конструкция блока детектирования не накладывает ограничений ни на выбор длины волны стимулирующего света, ни на режим работы стимуляции: непрерывный или импульсный.

Приводятся примеры технических решений по применению детекторов ТЛД-500К для измерения параметров импульсных сильноточных электронных пучков.

4. Способ измерения дозы в твердотельных детекторах ионизирующих излучений на основе оксида алюминия, накопленной при повышенной температуре окружающей среды (Патент РФ № 2346296)

В предлагаемом способе детекторы предварительно отжигаются при температуре 1100 – 1200 К в течение 10-15 минут для опустошения глубоких и основной ловушек. Во время облучения при повышенных температурах окружающей среды (530 – 630 К) рентгеновским или гамма излучением происходит заполнение глубокой ловушки соответственно дозе облучения. Измеряют сигнал ОСЛ, индуцированный облучением тестовой дозой гамма- или бета-излучением при комнатной температуре. Основываясь на том факте, что интенсивность ОСЛ зависит от состояния заселенности глубоких ловушек, по измеренному выходу ОСЛ определяют дозу, накопленную детекторами при облучении в условиях повышенных температур.

5. Способ возбуждения дозиметрического сигнала оптически стимулированной люминесценции детекторов ионизирующих излучений на основе оксида алюминия (Патент РФ № 2399928).

Основываясь на результатах изучения спектров оптического опустошения основной ловушки и параметров ОСЛ предложено

использование в качестве источника стимуляции сверхъяркого светодиода белого свечения.

Таким образом, в предлагаемом способе возбуждения ОСЛ за счет сплошного спектра возбуждения резонансные условия для освобождения захваченных при облучении носителей заряда с последующей их рекомбинацией, сопровождающейся люминесценцией, создаются для гораздо большего числа ловушек, чем при возбуждении ОСЛ в узком спектральном диапазоне. Это позволит существенно сократить время считывания, повысить чувствительность проводимых измерений, упростить конструкцию блока детектирования ОСЛ.

### **Основные результаты и выводы**

Для дозиметрических кристаллов анион-дефектного корунда результаты исследований их радиационно-оптических свойств сводятся к следующему:

1. Создан оригинальный экспериментальный комплекс для исследования высокотемпературной термолюминесценции, использующий различные законы нагрева образцов в диапазоне температур 300 – 1200 К со скоростью 0,5 – 32 К/с. В состав комплекса входит принципиально новое решение блока регистрации ОСЛ, позволяющего проводить параллельные исследования механизмов интерактивного взаимодействия центров захвата зарядов в кристаллах анион-дефектного корунда методами ТСЛ, ФТТЛ и ОСЛ.

2. Показано, что данные ИКЛ отражают общую оптически активную дефектность исследованных кристаллов и служат средством контроля однородности их свойств, необходимого для воспроизводимости и достоверности полученных научных результатов.

3. Установлено, что, в отличие от возбуждения УФ, рентгеновским, гамма – излучениями, кратковременное облучение мощным электронным пучком эффективно заполняет глубокие ловушки в исследуемых образцах при комнатной температуре.

4. Показана возможность диагностики электронных пучков после предварительного их использования для заполнения глубоких ловушек в образцах, в частности, определение дозы и ее распределения по поверхности выходного окна ускорителя, оценки энергии электронов по данным ТЛ.

5. Приведены новые экспериментальные доказательства реальности существования интерактивного механизма взаимодействия между центрами захвата носителей заряда в кристаллах анион-дефектного корунда путем установления зависимости эффективности заполнения глубокой ловушки от скорости нагрева кристаллов при считывании ТЛ.

6. В рамках модели интерактивного взаимодействия ловушек экспериментально и теоретически нелинейность дозовой зависимости объяснена ростом чувствительности кристаллов за счет заполнения глубоких ловушек в циклах облучение – нагрев.

7. Получены спектры оптически стимулированного опустошения/заполнения ловушек, ответственные за основной ТЛ пик, позволяющие предполагать, что ТЛ пик состоит из нескольких перекрывающихся компонентов, обусловленных не одной, а несколькими пространственно примыкающими друг к другу ловушками, каждая из которых имеет свою собственную оптическую глубину.

8. Интерактивная связь между центрами захвата носителей заряда подтверждена новыми данными комплексных исследований ТЛ, ФТТЛ и ОСЛ. Показано, что ловушки, ответственные за основной ТЛ пик, близкие по природе с ответственными за ОСЛ, могут не только терять захваченный заряд при оптической стимуляции, но и захватывать его из предварительного заполнения глубоких ловушек.

9. Результаты исследованных в работе особенностей люминесценции, связанные с механизмом интерактивного взаимодействия центров захвата носителей заряда различной энергетической глубины в кристаллах анион-дефектного корунда, предложены для развития дозиметрических аспектов применения ТЛ и ОСЛ, а также разработок, выполненные на уровне защищенных патентами изобретений, направленных на расширение функциональных возможностей стандартных ТЛ детекторов ядерных излучений ТЛД-500К.

**Основные результаты** диссертационной работы опубликованы в следующих работах, а также в трудах вышеуказанных конференций:

1. Interaction between trapping centers in corundum anion-defective single crystals / V.S. Kortov, S.V. Nikiforov, I.I. Milman, E.V. Moiseykin // *Functional Materials* 10, No. 1 (2003). P. 156-160.

2. Luminescence properties of  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  dosimetric crystals exposed to a high-current electron beam / I.I. Milman, E.V. Moiseykin, S.V. Nikiforov, S.G. Mikhailov, V.I. Solomonov // *Radiation Measurements*, Volume 38, Issues 4-6 (August-December 2004), pp 443-446.

3. Specific features of luminescence of radiation-colored  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  single crystals / V.S. Kortov, S.V. Nikiforov, I.I. Milman, E.V. Moiseykin // *Radiation Measurements*, Volume 38, Issues 4-6 (August-December 2004), pp 451-454

4. Оптически-индуцированные эффекты в термолюминесценции дозиметрических кристаллов анион-дефектного корунда / В.С. Кортов, И.И. Мильман, Е.В. Моисейкин, С.В. Никифоров // *Журнал прикладной спектроскопии*, V. 71, № 2, (2004), с. 227-230.

5. Фототрансферная термолюминесценция в анион-дефектных кристаллах  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  / В.С. Кортов, И.И. Мильман, С.В.Никифоров, Е.В. Моисейкин, М.М. Овчинников // *Физика твердого тела*, 2004, том 46, выпуск 12, с. 2143-2147.

6. Оптически стимулированная люминесценция дозиметрических кристаллов анион-дефектного корунда / И.И. Мильман, Е.В. Моисейкин, С.В. Никифоров // *Журнал прикладной спектроскопии*. Том 72, № 1, (2005), 140-142.

7. The role of deep traps in the luminescence mechanism of anion-defective single crystals of aluminum oxide / V.S. Kortov, I. I. Milman, S.V. Nikiforov, E.V. Moiseykin // Phys.Stat. Sol. (c) 2, № 1, (2005), 515- 518.

8. Механизм формирования нелинейности дозового выхода термостимулированной люминесценции анион-дефектных кристаллов  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  / В.С. Кортков, И.И. Мильман, С.В. Никифоров, Е.В. Моисейкин // Физика твердого тела, 2006, Том 48, выпуск 3, стр. 421-426.

9. Патент РФ на изобретение № 2275655. Способ повторного измерения дозиметрического термолуминесцентного сигнала в твердотельных детекторах ионизирующих излучений / В.С.Кортков, И.И. Мильман, С.В. Никифоров, Е.В. Моисейкин. Заявка 16.06.2004. Оpubл. 27.04.2006.

10. Deep - Trap Competition Model for TL in  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  Heating Stage / V.S. Kortov, I. I. Milman, S.V. Nikiforov, E.V. Moiseykin, M.M.Ovchinnikov / Radiation Protection Dosimetry. 2006. April 27, Vol. 119, №1-4, pp. 41-44

11. Патент РФ на изобретение № 2288485. Способ термолучевой подготовки к экспозициям термолуминесцентных детекторов ионизирующих излучений на основе оксида алюминия / В.С.Кортков, И.И. Мильман, С.В. Никифоров, Е.В. Моисейкин. Заявка 18.05.2005. Оpubл. 27.11.2006 Бюл. № 33

12. Патент РФ на изобретение № 2310889. Устройство для измерения дозиметрического сигнала оптически стимулированной люминесценции / И. И. Мильман, С.В. Никифоров, Е.В. Моисейкин, И.Г. Ревков Заявка 07.08.2006. Оpubл. 20.11.2007.

13. Nonlinear dose dependence of TLD-500 detectors resulting from interactive interference of traps / V.S. Kortov, I.I. Milman, S.V. Nikiforov, E.V. Moiseykin and S.V. Kondrashov / Radiation Measurements. 2007. V.42, p. 590-593.

14. Роль глубоких ловушек в люминесценции анион-дефектных кристаллов  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  / И.И. Мильман, Е.В. Моисейкин, С.В. Никифоров, С.В.Соловьев, И.Г.Ревков, Е.Н.Литовченко / Физика твердого тела, 2008, том 50, выпуск 11. с.1991–1995

15. Патент РФ на изобретение № 2346296. Способ измерения дозы в твердотельных детекторах ионизирующих излучений на основе оксида алюминия, накопленной при повышенной температуре окружающей среды / И.И. Мильман, Е.В. Моисейкин, С.В. Никифоров, И.Г. Ревков, Е.Н. Литовченко, С.В. Соловьев/ Заявка 16.07.2007. Оpubл. 10.02.2009 Бюл. № 4

16. Повышение эффективности возбуждения оптически-стимулированной люминесценции дозиметрических кристаллов  $\alpha\text{ Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  / Изв. вузов. Физика. –2009. – №8/2. с.122 - 125 / И.И. Мильман, С.В. Соловьев, Е.В. Моисейкин, И.Г. Ревков, Е.Н. Литовченко

17. Глубокие ловушки в кристаллах  $\alpha\text{ Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  / Изв. вузов. Физика. – 2009. – №8/2. с.223 – 226 / С.В. Соловьев, Е.В. Моисейкин, Е.Н. Литовченко, И.Г. Ревков, И.И. Мильман

18. Термо-фотоиндуцированное преобразование спектра ТЛ в дозиметрических кристаллах  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$ . / Научный журнал «Физика», 2010,

№1, С.184-190. Материалы Иссык-Кульской международной конференции по радиационной физике, новым материалам и информационным технологиям, SCORPH-2010, 5-8 августа 2010. / Соловьев С.В., Мильман И.И., Сюрдо А.И., Е.В. Моисейкин

19. Люминесцентные свойства монокристаллов номинально чистого анион-дефектного корунда / Проблемы спектроскопии и спектрометрии. Межвузовский сборник научных трудов. Выпуск 26. Екатеринбург, УГТУ-УПИ, 2010, С. 27-52. / Е.В. Моисейкин, И.И. Мильман

20. Термо-фотоиндуцированное преобразование F- и F<sup>+</sup>-центро в анион-дефектных кристаллах  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:C. / Межвузовский сборник научных трудов. Проблемы спектроскопии и спектрометрии. Выпуск 27. Екатеринбург, УрФУ, 2010, С. 65-73./ Соловьев С.В., Моисейкин Е.В., Мильман И.И., Сюрдо А.И

21. Патент РФ на изобретение № 2399928. Способ возбуждения дозиметрического сигнала оптически стимулированной люминесценции детекторов ионизирующих излучений на основе оксида алюминия / И.И. Мильман, А.В. Кружалов, Е.Н. Литовченко, Е.В. Моисейкин, И.Г. Ревков, С.В. Соловьев, А.И. Сюрдо/ Заявка 23.03.2009. Оpubл. 20.09.2010 Бюл. № 26